歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究

仕上げ材が施された床に対する加振, 受振装置の適用方法の設定

STUDY ON EXCITATION APPARATUS AND PERCEPTION APPARATUS
FOR EVALUATING FLOOR VIBRATION CAUSED BY HUMAN WALKINGEstablishment of measurement method of vibration of floor
covered with finishing material横山 裕*¹, 佐藤正幸*²

Yutaka YOKOYAMA and Masayuki SATO

This paper presents the method to apply excitation and perception apparatus to floors covered with finishing materials. The apparatus had been developed by the author for evaluating floor vibrations caused by human walking. At first, vertical loads applied to floors by walking people and the apparatus, and floor vibrations caused by walking, were measured and compared by using some finishing materials. Secondly, from the result of the measurement and the comparison, it has been shown that the vibrations were hardly influenced by finishing materials. As a result, the method of measuring floor vibrations directly after removing finishing materials from floors, was established for the measurement method of vibrations of floors covered with finishing materials.

Keywords : walking, floor vibration, measurement method, evaluation method, excitation and perception apparatus, finishing material
歩行, 床振動, 測定方法, 評価方法, 加振, 受振装置, 仕上げ材

1. はじめに

人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法を提示するためには、妥当かつ再現性の高い床振動の測定方法の確立と、測定した床振動を評価するための評価指標の究明が必要である。

筆者らの一部と小野はこれまでに、

- ・振動発生者と受振者が同じ場合の評価方法^{1),2)}
- ・振動発生者と受振者が異なる場合の評価指標^{3),4)}

を提示, 究明するとともに、振動発生者と受振者が異なる場合の測定方法確立のために必要な、

- ・受振者の人体が床振動に与える影響を再現できる床振動測定装置^{3),4)}

を開発している。しかし再現性の高い測定方法確立のためには、さらに振動発生者が床に与える加振外力および振動発生者の人体が床振動に与える影響を再現できる装置の開発が必要である。

以上より筆者らは、代表的な日常的動作である歩行を対象に、歩行者が床に与える加振外力を再現できる加振装置(衝撃的加振器, 動的加振器)、および歩行者の人体

が床振動に与える影響を再現できる受振装置(受振器)を開発している^{5),6)}。しかしカーペット, 畳など大きな局部変形をともしかなりやわらかい仕上げ材が施された床に対する加振, 受振装置の適用の可否の検討は、今後の課題としている。

本報は、かなりやわらかい仕上げ材を含むいくつかの仕上げ材を用いて、仕上げ材による加振外力や床振動の変化などについて検討し、仕上げ材が施された床に対する加振, 受振装置の適用方法を設定した経過, 結果を述べるものである。

なお本報は、日本建築学会東海支部研究発表会での報告⁷⁾に、さらに検討を加えたものである。

2. 本研究の目的, 範囲

図-1に、人間が歩行時に床に与える荷重の時間変化(荷重・時間曲線)および歩行時に発生する床振動(変形・時間曲線, 加速度・時間曲線)の例^{5),6)}を、吉岡らが測定した足の接地状況との関係例⁸⁾とともに示す。図に示した床振動の例は、周囲から縁の切れた床上に1歩着地して歩

*¹ 名古屋工業大学工学部社会開発工学科
助教授・工博

*² 榊大林組(当時名工大大学院) 修士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., Faculty of Eng.,
Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.
Obayashi Corporation, M. Eng.

き抜けた場合のものである。

歩行時に発生する床振動は、一般に、かかとの先端が着地した時点の荷重のピーク p_1 により励起される床の固有振動数での減衰振動(加速度・時間曲線参照)と、足裏全体が着地した時点の荷重のピーク p_2 などに相応した動変形(変形・時間曲線参照)が複合された、複雑な性状を示す^{1),9)}。

筆者らの一部と小野はこれまでに、振動発生者と受振者が異なる場合、変形・時間曲線、加速度・時間曲線から求められる物理量 $VI(2)$ で床振動の感覚上の大きさを表示できることを明らかにし、さらに $VI(2)$ と人間の床振動に対する評価との関係から、床振動の評価指標を究明している^{3),4)}。ここで $VI(2)$ は下式で与えられる。

$$VI(2)=0.2 \cdot \log(D_{\max}/D_{\text{ref}})+0.5 \cdot \log(V_m/V_{\text{ref}})+\log(Th/T_{\text{ref}})$$

ここで $D_{\max}$: 最大変形量

V_m : $D_{\max}$ を T_m で除した変形速度

Th : 床の固有振動数での減衰振動の振幅が14.1Gal(20dB(VAL)¹⁰⁾まで減衰するのに要する振動減衰時間

いずれも図-1参照

また D_{ref} , V_{ref} , T_{ref} は無次元化のための定数

$$D_{\text{ref}}=1(\text{cm}), V_{\text{ref}}=1(\text{cm/s}), T_{\text{ref}}=1(\text{s})$$

上式は、人間の動作により発生する複雑な床振動に対する振動感覚および居住性の観点からの評価は、受振初期の振動の強さを表す $D_{\max}$, V_m と、その後の振動の続き具合を表す Th とを複合した物理量で説明できることを表している。

以上より、振動発生者と受振者が異なる場合の床振動の評価方法を提示するためには、 $D_{\max}$, V_m , Th の測定方法を確立する必要があるといえる。具体的には、筆者らの一部と小野が開発した受振者の人体が床振動に与える影響を再現できる床振動測定装置^{3),4)}の他に、振動発生者が床に与える加振外力および振動発生者の人体が床振動に与える影響を再現できる加振、受振装置を開発

し、人間の動作時の $D_{\max}$, V_m , Th を再現する必要があるといえる。

図-2に、既報^{5),6)}で開発した、歩行者が床に与える加振外力および歩行者の人体が床振動に与える影響を再現できる3種の加振、受振装置の概要を示す。このうち動加振器、受振器は、筆者らの一部と小野が開発した床振動測定装置¹⁾⁻⁴⁾を準用したものである。

衝撃的加振器は、ピーク p_1 に寄与する人体の有効重量に近似した重量の落下体を足裏のかかと先端部に近似したかたさを有する緩衝材上にかかと先端着地時と同等の衝突速度で落下させることにより、ピーク p_1 と同等の加振外力(以降“衝撃的加振外力”と記す)を床に与え、 A_i , T_i (図-1参照)を再現するものである。動加振器は、ピーク p_2 に寄与する人体の有効重量に近似した重量の重

図-1 人間が歩行時に床に与える荷重および歩行時に発生する床振動の例

図-2 加振、受振装置の概要

錘を足腰などと同等の衝撃吸収作用を有する減衰性の高いゴムばね上に落下させることにより、ピーク p_2 と同等の加振外力(以降“動的加振外力”と記す)を床に与え、 D_{max} 、 V_m を再現するものである。また受振器は、床の固有振動数での振動の減衰性状に影響すると思われる着地後の歩行者の人体と近似した振動特性を有する1自由度振動系(重量40kgf, 固有振動数約4Hz, 減衰定数約20%)を加振点に付加し振幅の半減時間 $Th_{1/2}$ (図-1参照)を再現するもので、動的加振器の重錘をゴムばね上に静的に载荷したものである。 Th は衝撃的加振器、受振器で再現される A_i 、 T_i 、 $Th_{1/2}$ から算出される。なお装置の開発経緯、操作方法などは既報^{5),6)}(以降単に“既報”と記す)で述べている。

ここで装置の落下体、落下重錘の重量および緩衝材、ゴムばねの衝撃吸収作用などを歩行者の人体や動作の特性に近似させたのは、床の有効重量、固有振動数(すなわち剛性)、減衰定数などの振動特性による歩行時の加振外力の変化を再現するうえで必要と考えられたことによる。既報では、かなりやわらかい仕上げ材が施された床を除き、種々の材料、構法の床の振動特性の範囲を包含するよう設定した24種の試料床を用い、歩行時と装置による加振、受振時の D_{max} 、 V_m 、 Th が一致すること、すなわち開発した装置で加振外力の変化を十分再現できているとみなせることを、実験的に確認している。しかし大きな局部変形をとともなうかなりやわらかい仕上げ材が施された床では、局部変形に寄与する仕上げ材の有効重量が既報で主に対象とした梁、床板などのたわみ変形に寄与する床の有効重量の範囲と比較して非常に小さいことから、装置の適用の可否について新たに検討する必要があると考えられる。

本研究は、かなりやわらかい仕上げ材を含むいくつかの仕上げ材を用いて加振、受振装置の適用の可否について検討し、仕上げ材が施された床に対する加振、受振装置の適用方法を設定することを目的とする。

なお本研究では、加振点で発生した振動は主に床下地を伝搬して受振点に達することから、仕上げ材上歩行時に床下地に発生する振動を再現できるよう加振、受振装置の適用方法を設定することとする。ここで床下地とは、床から仕上げ材を取り除いた部分とする。

3. 歩行者および加振装置が床下地に与える荷重の比較
はじめに、加振、受振装置の適用方法設定のための基礎資料を得る目的で、歩行者および衝撃的加振器、動的加振器が仕上げ材を介して床下地に与える荷重を測定し、仕上げ材による加振外力の変化を比較することとした。

3.1 歩行者が床下地に与える荷重の測定

歩行者が床に与える荷重を本研究と類似する観点から

表-1 歩行者が床下地に与える荷重の測定条件

測定装置	図-3参照
仕上げ材	仕上げ材無 クッション材付フローリング (フローリング9mm厚,クッション材6mm厚) 畳(58mm厚) カーペット+フェルト1枚 (カーペット9mm厚,フェルト7mm厚) カーペット+フェルト2枚 (カーペット9mm厚,フェルト7mm厚×2)
動作	歩行(住居内を想定)
履物	くつ下
被験者	成人男子5名 (年齢21~34歳,体重49.63~96.85kgf)
測定回数	被験者1名につき10回

図-3 荷重の測定装置の概要

複数の仕上げ材を用いて測定した例としては、荷重計を用い荷重計表面のカーペット有、無の条件で荷重を測定した鈴木らの研究¹¹⁾、圧力センサーシートをくつ下表面に貼付して種々の仕上げ材が施された床表面に足裏各部が与える荷重を測定した井上らの研究¹²⁾があり、貴重な成果が報告されている。しかしこれらの成果から D_{max} 、 V_m 、 Th に直接影響するピーク p_1 、 p_2 の分布の変化について検討するための基礎資料を直接得るのは困難なことから、本研究ではいくつかの仕上げ材を用いて荷重を測定することとした。

3.1.1 測定条件

荷重の測定条件を表-1に示した。以下に主な事項について説明を加える。

3.1.1.1 測定装置

測定装置の概要を図-3に示す。測定装置は、ほぼ剛床とみなせる荷重測定装置と荷重測定装置とは縁の切れた歩行路からなり、荷重測定装置、歩行路上に所定の仕上げ材を施すことにより、歩行者が仕上げ材を介して荷重測定装置(床下地に該当)に与える荷重を測定するものである。なお床下地に与えられる荷重は床下地の振動特性により変化するが、仕上げ材による加振外力の変化を検討する観点からはほぼ剛床とみなせる床下地のみで十分と考えられることを付け加える。

3.1.1.2 仕上げ材

仕上げ材は表-1に示す4種とし、比較のため仕上げ

図-4 歩行時および衝撃的加振器による加振時の $L_1/W, T_1$ 図-5 歩行時および動的加振器による加振時の $L_2/W, T_2$

材無も条件に加えた。仕上げ材の選定にあたっては、実在する仕上げ材のやわらかさの範囲を選定する仕上げ材で包含すること、やわらかさと加振外力の変化の関係を求める観点から数段階のやわらかさの仕上げ材を選定することなどに留意した。4種のうちカーペット+フェルト2枚は、実在する範囲内で最もやわらかい部類の仕上げ材として選定したものである。なお仕上げ材のやわらかさは材料の種類が同じでも種々異なることから、選定した以外の種々のクッション材付フローリング、畳、カーペット+フェルトでの加振外力の変化は、選定した仕上げ材とは異なると思われることを付け加える。

3.1.1.3 履物

履物はくつ下とした。これは既報で、靴着用時の床振動がくつ下着用時より感覚上大きくなることはほとんどないと想定できることを明らかにし、くつ下着用時のピーク p_1 、 p_2 を再現できる衝撃的加振器、動的加振器を開発していることによる。

3.1.1.4 動作

動作は、歩行路上を数歩歩行した後荷重測定装置中央に1歩着地し、反対側の歩行路上に歩き抜ける動作とした。動作の速さ、激しさなどは被験者の自由としたが、被験者には、既報と同様住居内を想定して動作するよう教示した。

3.1.1.5 被験者および測定回数

被験者として、成人男子5名(年齢21~34歳、体重49.63~96.85kgf)を選定した。また測定回数は、いずれの仕上げ材の場合も被験者1名につき10回とした。これはピーク p_1 、 p_2 の分布は歩行者の性により大きく変化し

ないこと、データ数が5名×10回=50個以上であれば大きく変化しないことが、既報の結果から考察されたことによる。なお幼児、高齢者などは、既報で述べた理由から対象外とした。

3.1.2 測定経過、結果

3.1.1で述べた条件で歩行者が床下地に与える荷重を測定した。具体的には、各被験者ごとに荷重測定装置中央に自然に着地できるよう歩行開始位置などの調整をかねた練習を十分に行った後、荷重測定装置上を歩き抜けた際の荷重・時間曲線を15回測定し、4~13回目の荷重・時間曲線からピーク p_1 、 p_2 を抽出した。なお歩行ステップの間隔は、いずれの被験者、仕上げ材でも約0.5sであった。

図-4、5に、測定の結果得られたピーク p_1 、 p_2 の分布を仕上げ材ごとに示す。図の縦軸はピーク p_1 、 p_2 における荷重 L_1 、 L_2 の被験者の体重 W に対する割合 L_1/W 、 L_2/W 、横軸は荷重の立ち上がりからピーク p_1 、 p_2 に達するのに要する時間 T_1 、 T_2 (いずれも図-1参照)を表す。ただしピーク p_1 は被験者、仕上げ材が同一の場合でも動作の形態などの影響により発生する場合としない場合があることから⁶⁾、仕上げ材ごとに50個の荷重・時間曲線からピーク発生率を求めるとともに、発生した場合のみを対象に L_1/W 、 T_1 の分布を求め、図-4に示した。

図-4から、仕上げ材によりピーク p_1 の発生率および分布が変化していることがわかる。これはピーク p_1 に寄与する人体の有効重量および足裏の衝撃吸収作用が比較的小さいため⁶⁾、仕上げ材のやわらかさの影響を受けやすいことによるものと思われる。またピーク発生率および

分布の変化の大きさから、選定した4種の仕上げ材のなかでは、クッション材付フローリングが最もかたく、続いて畳、カーペット+フェルト1枚の順でカーペット+フェルト2枚が最もやわらかいことがわかる。

一方図-5から、ピーク p_2 の分布は仕上げ材により大きく変化しないことがわかる。これはピーク p_2 に寄与する人体の有効重量および足腰などの衝撃吸収作用が仕上げ材の局部変形に寄与する有効重量および衝撃吸収作用と比較して非常に大きいため⁵⁾、仕上げ材の影響が相対的に現れにくいことによるものと思われる。この結果は既往の測定結果^{11),12)}と異なるものではない。またピーク p_2 に寄与する人体の有効重量および足腰などの衝撃吸収作用と着地後の歩行者の人体の有効重量および足腰などの衝撃吸収作用は近似していると想定できることから⁵⁾、着地後の歩行者の人体が床下地の振動に与える影響は、仕上げ材により大きく変化しないものと思われる。

なお図に示した仕上げ材無の場合のピーク p_1 の発生率およびピーク p_1 , p_2 の分布は、既報で得られた発生率、分布(くつ下の場合)とほぼ一致しており、測定結果の高い再現性が確認されたことを付け加える。

3.2 加振装置が床下地に与える荷重の測定

3.1.1.1で述べた荷重測定装置を用い、衝撃的加振器、動的加振器が仕上げ材を介して荷重測定装置(床下地に該当)に与える荷重を測定した。仕上げ材は3.1.1.2で選定した4種とし、比較のため仕上げ材無も条件に加えた。また測定回数は仕上げ材ごとに2~3回とした。

図-6, 7に測定した荷重・時間曲線の例を示す。それぞれの荷重・時間曲線からピーク p_1 , p_2 における荷重 L_1 , L_2 、および荷重の立ち上がりからピーク p_1 , p_2 に達するのに要する時間 T_1 , T_2 (いずれも図-6, 7参照)を求め、安定性を確認したうえで平均を算出した。

図-4に衝撃的加振器による加振時の L_1/W (ただし W は平均的な体重である60kgfとした^{5),6)}、 T_1 を仕上げ材ごとに示す。ここで中心仕様とは歩行時の L_1/W , T_1 の分布の中心近傍を、また最大仕様とは L_1/W の分布の最大近傍および T_1 の分布の中心近傍を、それぞれ再現するための仕様として既報で設定したもので、仕上げ材無の場合所期の L_1/W , T_1 を再現できていることが図から確認できる(仕様の詳細は図-2参照)。

また図から、仕上げ材によりピーク p_1 が変化していること、ピーク p_1 の変化の大きさからみた仕上げ材の序列は歩行時と同様であることがわかる。ここで、歩行時と衝撃的加振器による加振時の T_1 がいずれの仕上げ材でも同程度であることから、衝撃的加振器の落下体重量や緩衝材の衝撃吸収作用などが、仕上げ材による歩行時の T_1 の変化を再現する観点から十分妥当とみなせることがわかる。しかし L_1/W は、衝撃的加振器による加振時には仕上げ材がやわらかいほど減少しているのに対し、歩行時

図-6 衝撃的加振器が床下地に与える荷重の例

図-7 動的加振器が床下地に与える荷重の例

には大きく変化しておらず、かなりやわらかい仕上げ材の場合、衝撃的加振器で所期の L_1/W を再現できているとはいいがたい。これは歩行の場合、着地時の荷重・時間曲線はかかと先端の着地による荷重・時間曲線と足裏全体の着地による荷重・時間曲線が複合されたものであり、 L_1 にはかかと先端の着地による T_1 の時点での荷重(ピーク値)のほかに足裏全体の着地による T_1 の時点での荷重が加算されていることによるものと思われる。すなわかなりやわらかい仕上げ材が施された床では、かかと先端の着地による T_1 の時点での荷重(ピーク値)は減少するものの、 T_1 が大きくなるため足裏全体の着地による T_1 の時点での荷重が増加し、結果的に L_1 はほとんど変化しないものと思われる。したがって落下体重量や緩衝材の衝撃吸収作用などが十分妥当であっても、衝撃的加振器でかなりやわらかい仕上げ材上歩行時の L_1/W を再現するのは困難と考えられる。

一方図-5に動的加振器による加振時の L_2/W (ただし $W=60\text{kgf}$)、 T_2 を仕上げ材ごとに示す。図から、動的加振器による加振時のピーク p_2 は歩行時と同様仕上げ材により大きく変化しておらず、いずれの仕上げ材でも歩行時のピーク p_2 の分布の中心近傍を十分再現できていることがわかる。これは、動的加振器の落下重錘、ゴムばねが、歩行者の人体と同様、仕上げ材によりピーク p_2 がほとんど変化しない程度まで十分大きな重量、衝撃吸収作用を有していることによるものと思われる。以上より、動的加振器で仕上げ材のいかにかわらず歩行時のピーク p_2 を再現できることが明らかになったといえる。

3.3 加振、受振装置の適用方法に関する基礎的検討

仕上げ材によるピーク p_1 , p_2 の変化を歩行時と衝撃的加振器、動的加振器による加振時とで比較した結果が

ら、以下の事項が考察できる。

- ・比較的かたい仕上げ材が施された床では衝撃的加振器で歩行時の A_i , T_i を再現できる可能性が高いが、かなりやわらかい仕上げ材が施された床では再現できない可能性が高い。
- ・仕上げ材のいかんにかかわらず、動的加振器で歩行時の D_{max} , V_m を再現できる可能性が高い。また3.1.2で述べた理由から、 D_{max} , V_m を再現できる動的加振器と同一の重錘およびゴムばねからなる受振器で、仕上げ材のいかんにかかわらず歩行時の Th_{alf} を再現できる可能性が高い。

以上より、仕上げ材が施された床に対して、動的加振器、受振器は仕上げ材のいかんにかかわらず適用できる可能性が高いが、衝撃的加振器は仕上げ材がかなりやわらかい場合適用できない可能性が高いことが明らかになったといえる。

一方図-4, 5などから、仕上げ材上歩行時に床下地に発生する振動について以下の事項が考察できる。

- ・歩行時の L_f/W は仕上げ材により大きく変化しないことから、 A_i は仕上げ材により大きく変化しない可能性がある。一方 T_i は変化すると思われるが、振動感覚や居住性の観点からの評価に直接影響する Th は主に A_i , Th_{alf} により決定されることから⁹⁾、 Th は T_i により大きく変化しないと想定できる。
- ・歩行時のピーク p_0 は仕上げ材により大きく変化しないことから、 D_{max} , V_m は仕上げ材により大きく変化しない可能性が高い。また3.1.2で述べた理由から、歩行時の Th_{alf} は仕上げ材により大きく変化しない可能性が高い。

以上より、仕上げ材上歩行時に床下地に発生する振動の D_{max} , V_m , Th は、仕上げ材を取り除き直接床下地上を歩行した時の D_{max} , V_m , Th と大きく異なる可能性があることがわかる。

ここで仮に両者が大きく異なる場合、仕上げ材上歩行時の床下地の D_{max} , V_m , Th は、仕上げ材を取り除き装置で直接床下地を加振、受振することにより再現できることになる。すなわち仕上げ材を取り除き装置で直接床下地を加振、受振する方法を、かなりやわらかい仕上げ材を含む種々の仕上げ材が施された床に対する加振、受振装置の適用方法として設定できることになる。

以上より本研究では、種々の振動特性を有する床下地を用いて仕上げ材上歩行時と直接床下地上を歩行した時の床下地の振動の関係について検討し、両者の D_{max} , V_m , Th が大きく異なる場合、仕上げ材を取り除き装置で直接床下地を加振、受振する方法を、仕上げ材が施された床に対する加振、受振装置の適用方法として設定することとした。

図-8 試料床の概要

表-2 試料床の振動特性

No.	w (kgf)	f (Hz)	h (%)	No.	w (kgf)	f (Hz)	h (%)
1	30.7	11.84	2.56	7	291.7	11.34	5.18
2	30.7	19.99	1.08	8	559.5	5.16	1.57
3	30.7	34.37	4.74	9	559.5	15.55	1.96
4	85.7	7.07	1.68	10	1073.5	11.99	1.18
5	85.7	25.29	1.36	11	1073.5	7.68	4.78
6	168.1	11.18	10.13				

No.: 試料床ナンバー

w: 重量可変パネルの重量

f: 固有振動数

h: 減衰定数

4. 仕上げ材が施された床に対する加振、受振装置の適用方法の設定

4.1 歩行時の床下地の振動の比較

4.1.1 試料床の設定

既報で加振、受振装置の妥当性検討に用いた試料床を床下地として用い、仕上げ材の有無、種類による床下地の振動の差について検討することとした。試料床の概要を図-8に示す。試料床は、重量可変パネル、コイルスプリングなどからなり、重量可変パネルの重量とコイルスプリングの剛性、減衰特性、個数などの組合せにより、種々の振動特性を得ることができる。また試料床は、周囲の歩行路とは縁の切れた構造となっている。試料床の振動は、重量可変パネル下面に取り付けた変位変換器、加速度計で測定することができる。

本研究では、既報で用いた24種の試料床の中から、表-2に示す11種を試料床として設定した。試料床の設定にあたっては、重量可変パネルの重量、固有振動数、減衰定数の範囲が実在する種々の材料、構法の床下地の有効重量、固有振動数、減衰定数の範囲^{13),14)}を包含する試料床群となるよう留意した。

4.1.2 歩行時の床下地の振動の測定

4.1.1で設定した試料床を用い、歩行時の試料床の振動を測定した。

試料床上に施す仕上げ材は3.1.1.2で選定した4種のうち最もかたいクッション材付フローリングと最もやわらかいカーペット+フェルト2枚の2種とし、直接床下地上を歩行した場合に該当する仕上げ材無も条件に加えた。履物は3.1.1.3で述べた理由からくつ下とし、仕上げ材無の場合のみ軟底運動靴を加えた。これは既報で想定した通り、靴着用時の床振動がくつ下着用時より感覚上大きくなることはほとんどないことを、実在する範囲内で靴底が最もやわらかい部類の履物である軟底運動靴を用いて確認する目的で加えたものである。動作は、歩行路上を数歩歩行した後試料床中央に1歩着地し、反対側の歩行路上に歩き抜ける動作とした。動作の速さ、激しさなどは被験者の自由としたが、被験者には、既報と同様くつ下の場合住居内、軟底運動靴の場合事務所、学校内を想定して動作するよう教示した。被験者×測定回数は既報の結果を参考に5名×3回とし、被験者として3.1.1.5と同一の成人男子5名を選定した。

以上の条件で歩行時の試料床の振動を測定した。具体的には、各被験者ごとに3.1.2で述べたと同様の練習を十分に行った後、試料床上を歩き抜けた際の変形・時間曲線、加速度・時間曲線を6回測定し、3～5回目の変形・時間曲線から D_{max} 、 T_m 、加速度・時間曲線から A_i 、 T_i を抽出した。さらに D_{max} 、 T_m から V_m を算出し、加速度・時間曲線の包絡線から Th_{lf} 、 Th を求めた。ただし変形・時間曲線、加速度・時間曲線は、体重比に基づいて各被験者の体重を60kgfとした場合に換算したものを用いた。

4.1.3 歩行時の床下地の振動の比較

図-9に仕上げ材有の場合と無の場合の D_{max} 、 V_m 、 A_i 、 T_i 、 Th_{lf} 、 Th の関係を示す。 D_{max} 、 V_m 、 Th_{lf} は各試料床あたり5名×3回=15個のデータの平均を、ま

クッション材付フローリングの場合と仕上げ材無の場合の関係

カーペット+フェルト2枚の場合と仕上げ材無の場合の関係

図-9 仕上げ材有の場合と無の場合の D_{max} 、 V_m 、 A_i 、 T_i 、 Th_{lf} 、 Th の関係

図-10 軟底運動靴着用時とくつ下着用時の D_{max} 、 V_m 、 A_i 、 T_i 、 Th_{lf} 、 Th の関係

た A_i , T_i , Th はばらつきが大きいことから15個のデータの分布の最大, 最小および中央値を示した。

図から以下の事項が考察できる。

- D_{max} , V_m , Th_{alf} は, 3.3で想定した通り仕上げ材の有無, 種類により大きく変化しない。
- A_i は, 仕上げ材の有無, 種類により大きく変化しない。一方 T_i は, やわらかい仕上げ材の場合ほど大きくなっている。
- Th は, 仕上げ材の有無, 種類により大きく変化しない。またこのことから, 3.3で想定した通り Th は T_i により大きく変化しないことがわかる。

ここでカーペット+フェルト2枚は実在する範囲内で最もやわらかい部類の仕上げ材であることから, 仕上げ材のいかにかわらず, 仕上げ材上歩行時と直接床下地上を歩行した時の床下地の D_{max} , V_m , Th は大きく異ならないことが明らかになったといえる。

つぎに図-10に, 軟底運動靴着用時とくつ下着用時の D_{max} , V_m , A_i , T_i , Th_{alf} , Th の関係を, 図-9と同様の要領で示す。

図から, D_{max} , V_m , Th_{alf} はほとんど変化しないこと, 軟底運動靴着用時の A_i がくつ下着用時より大きくなることはほとんどないこと, 軟底運動靴着用時の T_i はくつ下着用時より大きくなっているが Th への影響は小さく軟底運動靴着用時の Th がくつ下着用時より大きくなることはほとんどないことがわかる。この結果は, 既報でピーク p_1 の発生率およびピーク p_1 , p_2 の分布の履物による変化を測定した結果から想定された, 履物による歩行時の床振動の変化の傾向と一致する。すなわち既報で想定した通り, 靴着用時の床振動がくつ下着用時より感覚上大きくなることはほとんどないことが, 確認できたといえる。このことは, 使用される履物が特定できない通常の床では, くつ下着用時を対象に開発し

クッション材付フローリング上歩行時と装置で直接床下地を加振, 受振した時の関係

カーペット+フェルト2枚上歩行時と装置で直接床下地を加振, 受振した時の関係

図-11 仕上げ材上歩行時と装置で直接床下地を加振, 受振した時の D_{max} , V_m , A_i , T_i , Th_{alf} , Th の関係

た加振、受振装置を用いて床振動を測定して実用上さしつかえないことを意味しており、加振、受振装置の実用性の観点から有効な知見といえる。

4.2 仕上げ材が施された床に対する加振、受振装置の適用方法の設定

4.1で、仕上げ材上歩行時と直接床下地上を歩行した時の床下地の D_{max} 、 V_m 、 T_h は大きく異ならないことが明らかになったことから、仕上げ材を取り除き装置で直接床下地を加振、受振する方法を、仕上げ材が施された床に対する加振、受振装置の適用方法として設定する。

さらに設定した適用方法の妥当性を確認する目的で、4.1.1で設定した試料床を仕上げ材無の条件で装置で加振、受振して D_{max} 、 V_m 、 A_i 、 T_i 、 T_{half} 、 T_h を測定し、4.1.2で測定した2種の仕上げ材上歩行時の D_{max} 、 V_m 、 A_i 、 T_i 、 T_{half} 、 T_h との関係を検討した。

図-11に両者の関係を示す。 D_{max} 、 V_m 、 T_{half} は各試料床あたり15個の歩行時のデータの平均と装置による加振、受振時の平均の関係を、 A_i 、 T_i 、 T_h は15個の歩行時のデータの分布と装置による加振、受振時の平均の関係を示した。

図から、動的加振器、受振器で仕上げ材上歩行時の D_{max} 、 V_m 、 T_{half} を十分再現できること、衝撃的加振器(中心、最大仕様)で仕上げ材上歩行時の A_i の分布の中心、最大近傍を再現できること、衝撃的加振器による加振時の T_i は仕上げ材上歩行時より小さいが T_h への影響は小さく衝撃的加振器(中心、最大仕様)、受振器による A_i 、 T_i 、 T_{half} の測定結果から算出される T_h で仕上げ材上歩行時の T_h の分布の中心、最大近傍を再現できることがわかる。

以上より、設定した適用方法の妥当性が確認できたといえる。

5. おわりに

本研究の結論をまとめると、以下の通りである。

- ・歩行者が床下地に与える衝撃的加振外力は、仕上げ材の有無、種類により変化する。また比較のかたい仕上げ材が施された床では衝撃的加振器で歩行者が床下地に与える衝撃的加振外力を再現できるが、かなりやわらかい仕上げ材が施された床では再現できない。
- ・歩行者が床下地に与える動的加振外力、および着地後の歩行者の人体が床下地の振動に与える影響は、仕上げ材の有無、種類により大きく変化しない。また仕上げ材のいかにかわらず、動的加振器、受振器で歩行者が床下地に与える動的加振外力、および着地後の歩行者の人体が床下地の振動に与える影響を再現できる。
- ・仕上げ材上歩行時と直接床下地上を歩行した時の床下地の振動は感覚上大きく異ならない。このことから、

仕上げ材を取り除き装置で直接床下地を加振、受振する方法を、仕上げ材が施された床に対する加振、受振装置の適用方法として設定した。

- ・靴着用時の床振動がくつ下着用時より感覚上大きくなることはほとんどないことを確認した。

以上、既報で開発した加振、受振装置の概要を示すとともに、仕上げ材が施された床に対する加振、受振装置の適用方法を設定した経過、結果を述べた。本報と既報をあわせて、種々の材料、構法の床下地および仕上げ材からなる床に歩行時に発生する振動の妥当かつ再現性の高い測定方法が確立できたといえる。

謝辞

本研究のテーマ設定などにあたり種々御指導いただいた小野英哲先生(東京工業大学教授・工博)に厚く御礼申し上げます。また研究成果の適用性などについて常々討論していただいている榎田 裕氏(㈱竹中工務店東京本店・工博)および橋本嘉之氏(㈱竹中工務店技術研究所)に謝意を表します。なお研究費の一部に文部省科学研究費(奨励研究(A):横山 裕)を使用したことを付記します。

参考文献

- 1)小野英哲, 横山 裕: 人間の動作により発生する床振動の振動感覚上の表示方法に関する研究 ―振動発生者と受振者が同じ場合―, 日本建築学会構造系論文報告集, 第381号, pp. 1~9, 1987年11月
- 2)小野英哲, 横山 裕: 人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究 ―振動発生者と受振者が同じ場合(動作した人間自身が床振動を感じる場合)―, 日本建築学会構造系論文報告集, 第394号, pp. 8~16, 1988年12月
- 3)横山 裕, 小野英哲: 人間の動作により発生する床振動の振動感覚上の表示方法に関する研究 ―振動発生者と受振者が異なる場合―, 日本建築学会構造系論文報告集, 第390号, pp. 1~9, 1988年8月
- 4)横山 裕, 小野英哲: 振動発生者と受振者が異なる場合の床振動の評価方法の提示 人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究(第2報), 日本建築学会構造系論文報告集, 第418号, pp. 1~8, 1990年12月
- 5)横山 裕: 歩行時に発生する床振動評価のための加振、受振装置に関する研究 動的加振器、受振器の設定および妥当性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第466号, pp. 21~29, 1994年12月
- 6)横山 裕, 佐藤正幸: 歩行時に発生する床振動評価のための加振、受振装置に関する研究 衝撃的加振器の開発および振動減衰時間算出方法の妥当性の確認, 日本建築学会構造系論文集, 第476号, pp. 21~30, 1995年10月
- 7)横山 裕, 佐藤正幸: 歩行時に発生する床振動を再現できる

- 代替加振，受振装置の開発に関する研究 ～各種仕上げ材が施された床に対する適用性の検討～，日本建築学会東海支部研究報告集，第34号，pp.393～396，1996年2月
- 8)吉岡 丹，小野英哲，川村清志，茗ヶ原泰広：建築物の床のかたさおよびその評価方法に関する研究 その2．床のかたさに関する心理学的尺度と物理量の対応および床のかたさの評価式・最適値の表示，日本建築学会論文報告集，第246号，pp.17～24，1976年8月
- 9)日本建築学会：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説，1991年4月
- 10)三輪俊輔，米川善晴：振動の評価法1 正弦振動の評価法，日本音響学会誌，27巻1号，pp.11～20，1971年
- 11)鈴木敏夫，大山秀美，田中 清：居住床の振動予測・評価に関する研究 その1 研究目的および歩行荷重実験，日本建築学会大会学術講演梗概集D－1，pp.347～348，1995年8月
- 12)井上勝夫，木村 翔，前原暁洋，渡辺秀夫，松岡明彦：床歩行時の足裏各部の衝撃力特性 歩行感からみた住宅床の振動応答特性と床衝撃音遮断性能に関する研究 その1，日本建築学会計画系論文集，第477号，pp.1～10，1995年11月
- 13)櫛田 裕：統計的手法に基づく床振動評価に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，第407号，pp.57～67，1990年1月
- 14)大塚 毅：木造床構法の振動に対する感覚尺度的評価法に関する研究 一仕上材変化の影響一，日本建築工学会論文報告集，第2号，pp.11～20，1993年10月

(1996年4月8日原稿受理，1996年7月25日採用決定)